

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ АЛЬТЕРНАТИВНИХ
ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ**

Студент гр. ЕІ-81_к

А.В. Оробей

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., доцент

В.В. Бібик

Конотоп 2022

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є система дистанційного контролю альтернативних джерел живлення.

Мета роботи полягає у огляді сучасних альтернативних джерел живлення та в обранні дистанційних систем керування контролем, огляд контролерів що дозволять оперативно та швидко здійснювати контроль над системою.

Управління малопотужними системами, які включають відновлювані джерела енергії, локальну мережу, підсистему електрохімічного зберігання та підключення до мережі, за своєю суттю є ієрархічним. Нижній рівень складається з джерел енергії вітру та фотоелектричних (оптимізація перетворення енергії) систем керування.

У даній роботі розглядається проблема керування на вищому рівні та спрямована на генерацію керуючого рішення для передачі енергії між компонентами системи, враховуючи, що потужності відновлюваних джерел енергії та потужності в локальній мережі мають випадкові характеристики.

Було визначено три варіанти алгоритму керування, реалізованого з використанням методів нечіткої логіки, для контролю передачі енергії в системі. Особлива увага була приділена розробці моделей, що використовуються для моделювання компонентів розподіленої енергетичної системи та всієї системи керування. Це здійснюється шляхом врахування багатокритеріальної цілі продуктивності, коли потужність відновлюваних джерел енергії та навантаження мають випадкові характеристики.

Робота викладена на 35 сторінках, у тому числі включає 23 рисунків, список цитованої літератури із 22 джерел та 2 таблиць

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, КОНТРОЛЕР.

ЗМІСТ

С.

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ	5
1.1. Структура розподіленої системи виробництва електроенергії на основі відновлюваних джерел	5
1.2. Моделювання випадкових енергетичних потоків	7
1.3. Моделювання потужності, споживаної навантаженням	12
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	14
2.1. Інтелектуальні алгоритми керування розподіленою енергетичною системою	14
2.2. Прогнозування випадкових величин із розподіленої енергетичної системи	15
2.3. Схеми управління для розподіленої енергетичної системи	17
2.4. Критерій ефективності розподіленої енергетичної системи.....	19
РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	23
3.1. Оцінка багатокритеріальних показників ефективності.....	24
3.2. Покращений інтелектуальний алгоритм керування розподіленою енергетичною системою.....	29
ВИСНОВКИ	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34

ВСТУП

Відродження інтересу до використання відновлюваних джерел енергії, що спостерігається в даний час, обумовлено необхідністю зменшення значного екологічного впливу енергетичних систем, заснованих на використанні викопних видів палива.

Щоденні та сезонні ефекти та обмежена передбачуваність призводять до періодичної генерації. Розумні мережі обіцяють полегшити інтеграцію відновлюваних джерел енергії та забезпечать інші переваги.

Розподілені системи виробництва та використання електричної енергії на основі відновлюваних джерел є темою, яка широко розглядається в літературі, враховуючи їхню причетність до розвитку розумних мереж [1].

У цьому контексті важливу категорію становлять системи малої потужності (до 5 кВт), які забезпечують електроенергією місцевих споживачів, переважно з відновлюваних джерел енергії. У цьому випадку є система накопичення електричної енергії (батарея) та підключення до національної мережі для передачі надлишку/дефіциту енергії з потоку електроенергії. Ці розподілені системи, які будуть розглянуті в нашій статті, передбачають різні проблеми, такі як вибір відновлюваних джерел енергії, щоб одночасно задовольнити вимоги вартості та продуктивності для перетворення енергії, забезпечуючи тривалий термін служби батареї; забезпечення вимог до якості електричної енергії і, нарешті, розробка структури управління, що охоплює багатокритеріальний показник ефективності.

Щодо відновлюваних джерел енергії (сонячної та вітрової), то ключовим питанням є пошук керуючих рішень для забезпечення оптимальної роботи щодо критерію ефективності з урахуванням випадковості.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Структура розподіленої системи виробництва електроенергії на основі відновлюваних джерел

Спрощена блокова схема, що ілюструє структуру розподіленої енергії та виділяє пропонований вищий рівень управління, показано на рисунку 1.1

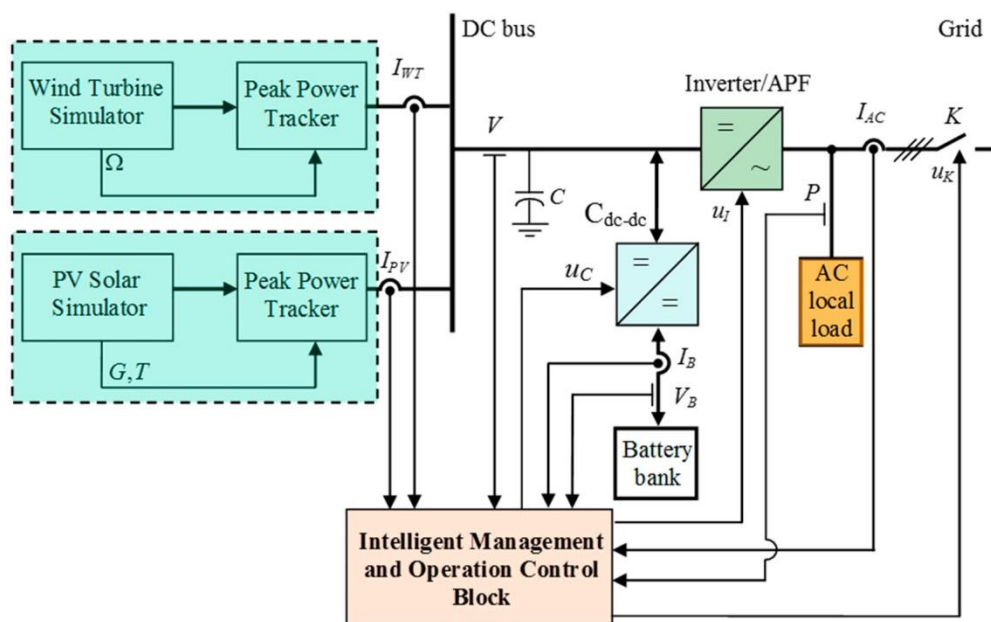


Рис.1.1 Спрощена блокова схема пропонованої системи [2]

Система включає два джерела енергії, засновані на перетворенні відновлюваної енергії: вітрогенератор і фотоелектричні панелі. Ці джерела вводять струми I_{WT} і I_{PV} в проміжний ланцюг постійного струму, і звідси потік енергії може передаватися або в локальну мережу, або, зрештою, в мережу або в акумулятор.

У першому випадку, якщо національна мережа підключена та доступна, блок з позначкою «Inverter/APF» увімкне функцію фільтра активної потужності та може досягти двонаправленої передачі енергії, забезпечуючи вимоги до якості електроенергії для підключення до мережі. Якщо відновлювані джерела виробляти більше енергії, ніж потрібно для

задоволення місцевих споживачів, а також потреби зарядного акумулятора, передача енергії в мережу замовляється на основі енергетичного балансу.

Однак, якщо енергії, що надається з відновлюваних джерел, недостатньо і є необхідність забезпечити потік електроенергії від мережі для зарядки батареї, тоді «Інвертор/АРФ» працює в режимі випрямляча ШІМ. Якщо національна мережа недоступна, блок «Інвертор/АРФ» працює лише як інвертор напруги, живлячи місцевих споживачів на основі наявної енергії в батареї та від відновлюваних джерел.

Другий випадок стосується передачі на або з батареї. Важливою умовою, яку накладає на систему критерій продуктивності, є забезпечення регулярного режиму зарядки та розрядки батареї (наскільки це можливо, враховуючи, що і відновлювані джерела, і навантаження мають випадкові характеристики) і на низькій частоті, щоб це призводить до більш тривалого терміну служби акумулятора. Ця вимога встановлюється через керування двонаправленим перетворювачем «Сdc-dc» одночасно з іншою одночасною вимогою: зменшенням передачі енергії від мережі до локальної мережі.

Ієрархічна система управління містить два рівні: нижчий рівень управління, який відноситься до систем управління, пов'язаних з компонентами системи, і вищий рівень, який відноситься до управління потоками енергії, враховуючи змішаний критерій, який враховує вартість енергії, а також термін служби батареї.

Впроваджений нижній рівень для вітроенергетичної системи забезпечує оптимальні режими вітротурбіни (з точки зору енергетичного критерію), тобто забезпечує максимальне перетворення потужності в області 2 (режим часткового навантаження) та обмеження потужності в області 3 (режим повного навантаження).) [2].

Рішення керування сонячною енергетикою забезпечує роботу на оптимальних режимних характеристиках на основі математичної моделі фотоелектричної панелі. Система управління для «Інвертора/АПФ» виконує режим ШІМ інвертора/випрямляча, що забезпечує рівень вихідної напруги

та вимоги до якості електроенергії, що пред'являються до фільтра активної потужності.

Система управління конвертора «Cdc-dc» забезпечує напрямок та інтенсивність передачі енергії. Вищий рівень управління реалізовано в «Блоці інтелектуального управління та управління операцією», а його проектування та реалізація будуть показані в наступних розділах.

1.2 Моделювання випадкових енергетичних потоків

В енергетичному балансі розподіленої системи мають місце такі енергетичні потоки з випадковою еволюцією: електроенергія виробляється за рахунок відновлюваних джерел енергії (вітер і сонце), а електроенергія споживається в локальній мережі (навантаження)..

Електрична потужність, яку забезпечує джерело вітру, P_{we} , моделюється як:

$$P_{we} = \eta_g P_{wm} = \eta_g * 0.5\pi\rho R^2 C_p(\lambda) u^3 \quad (1.1)$$

де P_{wm} це механічна сила,

η_g це ККД електрогенератора,

ρ – це щільність повітря,

R - довжина лопаті турбіни,

v – швидкість вітру,

$C_p(\lambda)$ – коефіцієнт потужності турбіни, який залежить від коефіцієнта швидкості наконечника $\lambda = R\Omega / u$.

В області часткового навантаження система управління вітровим джерелом забезпечує роботу турбіни на оптимальних режимних характеристиках, підтримуючи коефіцієнт швидкості наконечника на оптимальному значенні, λ_{opt} . Залежність електричної потужності від швидкості вітру має вигляд: $P_{we} = K_{pe} * u^3$, в якому $K_{pe} = \eta_g * 0.5\pi\rho R^2 C_{pmax}$ виходить із знання номінального значення електричної потужності та

швидкості вітру: $K_{Pe} = P_{we,r} / u^3$. В області повного навантаження, коли $u > u_r$, система управління турбіною повинна підтримувати потужність на номінальному значенні.

Швидкість вітру є нестационарною випадковою величиною, яку можна представити у вигляді:

$$u(t) = u(t) + u_t(t) \quad (1.2)$$

де $u(t)$ є середньо- та довгостроковим компонентом і $v_t(t)$ є компонентом турбулентності.

Для шкали часу, що відповідає компоненту турбулентності, $u(t)$ можна розглядати як постійне середнє значення швидкості вітру. Обидва компоненти важливі в розподілених системах для електроенергії виробництво з відновлюваних джерел.

Середньо- та довгостроковий компонент особливо важливий для вітрових систем середньої та високої потужності. Вони мають повільну динаміку та реагують на низькочастотні коливання швидкості вітру, що визначає послідовність ситуацій щодо потенціалу енергії вітру (високий, середній, низький). Малі турбіни, як розглядається в цій роботі, мають швидку динаміку, а також реагують на турбулентну складову швидкості вітру.

Для моделювання швидкості вітру відправною точкою була загальна широкосмугова модель Ван дер Ховена, дійсна для помірного поясу, яка надає інформацію про спектральну щільність потужності швидкості вітру., $S_{uu}(\omega)$, для обох компонентів на середньо- та довгостроковій перспективі, а також для компонента турбулентності.

Для створення часового ряду, який представляє компонент $v(t)$, було використано формуючий фільтр. Характеристики підсилення такого фільтра $G(\omega) = S_{uu}(\omega)$ були отримані на основі спектральної щільності потужності Ван дер Ховена, $S_{uu}(\omega)$, враховуючи лише область, що відповідає низьким частотам $\omega = (1e - 6, 1e - 3u)$ (rad/s). Було виявлено, що в

цій області непараметричні характеристики Бode можуть бути параметризовані асимптотичною характеристикою фільтра першого порядку, $G_f(\omega)$. Цей фільтр використовувався як формуючий фільтр для середньо- та довгострокових компонентів.

Властивості турбулентності в даний момент часу, коли значення середньо- і довготривалих компонентів вважається постійним, \bar{v} , залежать від середнього значення швидкості вітру через два параметри:

- інтенсивність турбулентності I , що визначається рівнянням:
- довжина турбулентності L_t , яка впливає на спектральну смугу пропускання часового ряду, $v_t(t)$.

Ці параметри залежать від середньої швидкості вітру, шорсткості поверхні та висоти від землі. Вони розраховуються за співвідношеннями, наведеними, відповідно до різних стандартів (наприклад, IEC Standard, DS 472 Danish Standard тощо).

Звичайними спектральними моделями турбулентності з фіксованою точкою є моделі фон Кармана та Каймала [3].

У цій роботі була прийнята перша модель, оскільки вона простіша у використанні. Тому, на основі спектральної моделі фон Кармана, передатна функція формуючого фільтра для створення турбулентності.

Схема чисельної генерації швидкості вітру наведена на рисунку 1.2.

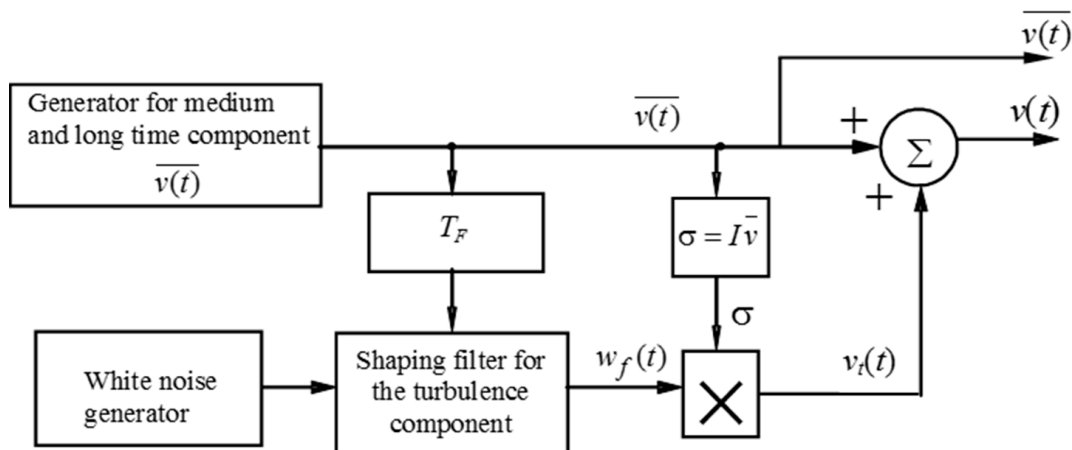


Рис. 1.2. Схема системи чисельної генерації швидкості вітру. [3]

На рисунку 1.3а показаний фрагмент зміни швидкості вітру, отриманий за схемою з рисунку 1.2, коли інтенсивність турбулентності дорівнює $I = 0.12$. Середньо- та довгострокова складова швидкості вітру показана червоним кольором.

Для виробництва енергії вітру - джерело номінальної потужності 1,5 кВт, отримане при номінальній швидкості вітру 11 m/s. Джерело починає виробляти енергію на швидкості включення турбіни 3.5 m/s. Нехтуючи динамікою джерела вітру малої потужності та беручи до уваги, що потужність, вироблена джерелом вітру, змінюється залежно від куба швидкості вітру, результуючий розподіл енергії вітру помітно відрізняється від розподілу швидкості вітру.

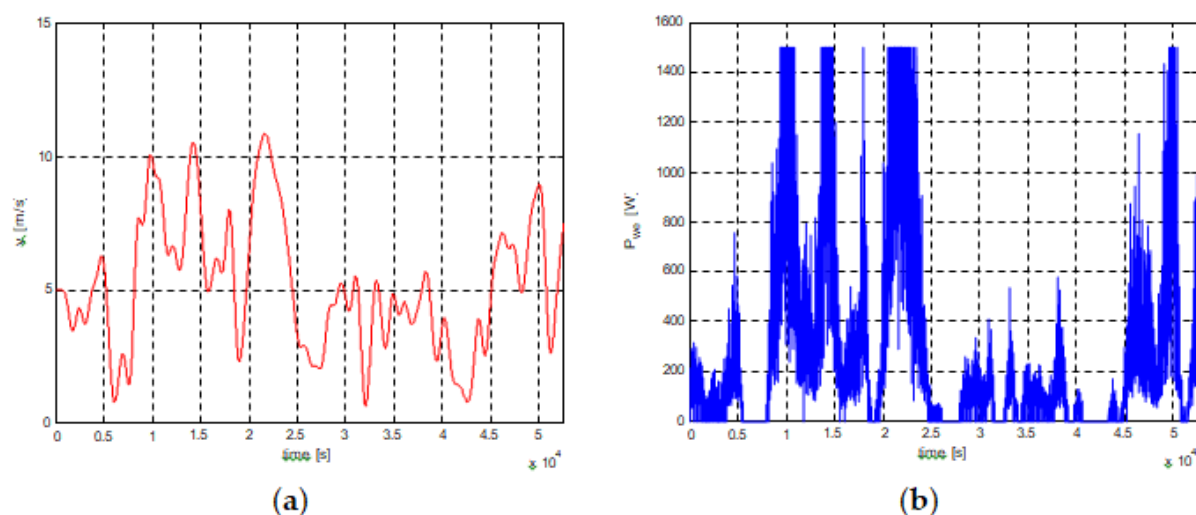


Рис. 1. 3. (а) Зразок еволюції швидкості вітру (синій) та середньо- та довгострокової складової (red); and (b) потужність джерела вітру для зразка швидкості вітру [4]

Для проведення чисельного моделювання розподіленої системи було розглянуто літній режим, коли джерело сонячної енергії може виробляти електроенергію з 6.00 до 20.00. Розраховані та прийняті значення оптичної та електричної потужності протягом літнього дня наведені в таблиці 1.1.

Вважалось, що фотоелементи мають ефективність перетворення близько 12%. У зв'язку з тим, що на освітленість може впливати рух хмар, опромінення розглядали як випадкову величину з повільною еволюцією, яка віднімається від електричної потужності, скоригованої з температурою. Зразок денної еволюції потужності, яку забезпечує джерело сонячної енергії, показано на рисунку 1.4.

Таблиця 1.1 Розглянуті параметри джерела сонячної енергії в літньому режимі.

Time During a Day	(W/m ²)	(kW)	(kW)	with Temperature (kW)
12 a.m.–6.00 a.m.	0	0	0	0
6.00 a.m.–7.00 a.m.	200	3.12	0.312	0.312
7.00 a.m.–8.00 a.m.	800	12.4	1.248	1.248
8.00 a.m.–11.00 a.m.	1000	15.0	1.56	1.56
11 a.m.–4.00 p.m.	800	12.4	1.56	1.404
4.00 p.m.–7.00 p.m.	1000	15.0	1.56	1.56
7.00 p.m.–8.00 p.m.	800	12.4	1.248	1.248
8.00 p.m.–9.00 p.m.	200	3.12	0.312	0.312
9.00 p.m.–12.00 a.m.	0	0	0	0

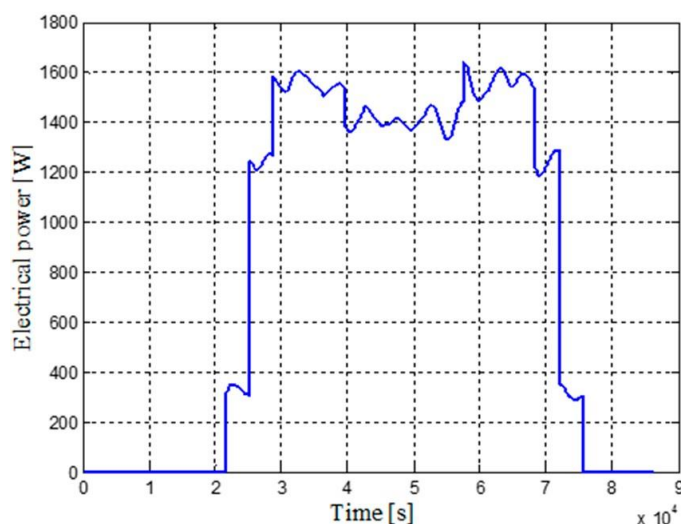


Рис. 1.4. Зразок електроенергії, виробленої сонячним джерелом енергії за добу, в літньому режимі [4]

1.3 Моделювання потужності, споживаної навантаженням

Репрезентативними електричними навантаженнями для розподілених систем можуть бути будинок, невелике господарство, гуртожиток тощо. У локальній мережі можуть бути споживачі, такі як холодильник, морозильна камера, мікрохвильова піч, пральна машина, невеликі машини тощо, а також установка освітлення.

Підключення цих одиниць до локальної мережі визначається денною діяльністю і може мати значну мінливість. Найважливішим аспектом добового розподілу спожитої електроенергії є можливість мати значні зміни потужності щодо середньої потужності. На рисунку 1.5 показаний профіль добових змін у локальній мережі, розглянутий при аналізі за допомогою чисельного моделювання розподіленої системи.

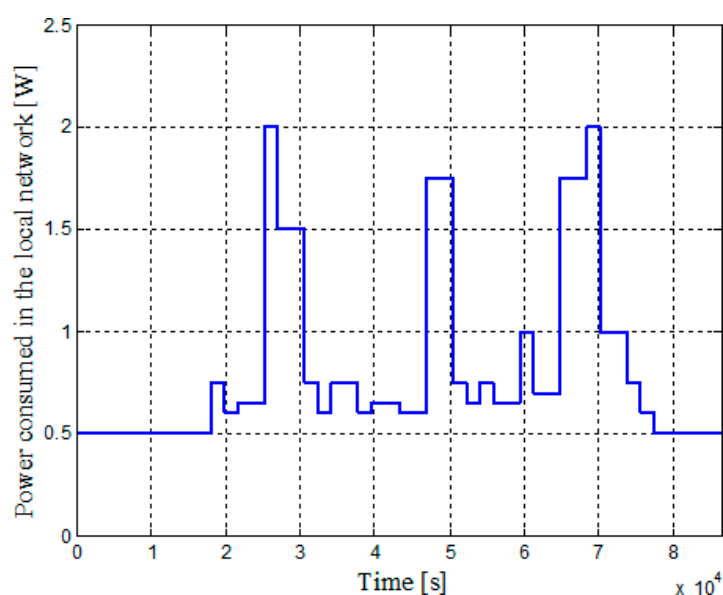


Рис. 1.5. Щоденна динаміка спожитої потужності в локальній мережі [5]

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Інтелектуальні алгоритми керування розподіленою енергетичною системою

Вищий рівень управління системою пов'язаний з розробкою алгоритму керування, який відповідає за передачу електричної енергії між компонентами системи: відновлюваними джерелами енергії, загальнодоступною мережею, накопичувачем енергії (батареею) та локальною мережею (навантаженням).

Алгоритм, про який йде мова, стосується двох аспектів: (а) напрямок передачі енергії і (б) величину передачі енергії, тобто передану потужність.

Той факт, що потужність, необхідна для навантаження, і вихідна потужність від відновлюваних джерел енергії є випадковими величинами, визначає різноманітність ситуацій керування. Наявність батареї дуже важлива не тільки як накопичувача надлишку енергії від відновлюваних джерел (що сприяє подачі навантаження під час дефіциту енергії), але і як «датчика» рівня енергії системи.

Еволюція напруги батареї, яка безпосередньо корелює із накопиченою енергією, значною мірою відображає енергетичний контекст розподіленої системи. Цей контекст можна охарактеризувати набором «станів», у яких можна знайти інтегровану систему. Вектор «станів» може бути визначений, поточним значенням напруги акумулятора, V_b , яке вважається пропорційним накопиченому енергії в системі, за зміною накопиченої енергії ΔV і за прогнозованими значеннями потужності для відновлюваних джерел енергії та для навантаження, відповідно.

Використання передбачення для кожного з трьох ступенів є нерозумним і надмірним. Важливим є прогноз дефіциту та надлишку

енергії в розподіленій системі, тобто різниця між потужністю для відновлюваних джерел енергії та для навантаження. Таким чином, «стани», які відображають контекст енергії системи, можуть бути визначені вектором. На основі цих станів система керування встановлює напрямок і величину передачі електричної енергії між розподіленою системою та мережею [6]

Алгоритм керування може розглядати два підходи, а саме, підхід чіткого типу, який використовує простий алгоритм для розпізнавання «контрольних ситуацій». Розглянемо наступні дискретні команди:

C1: важлива передача з мережі в розподілену систему ($P_{gs} = 100\%$);

C2: середня передача з мережі в розподілену систему ($P_{gs} = 50\%$);

C3: нульовий перенос між мережею в розподілену систему ($P_{gs} = 0\%$);

C4: передача середовища з розподіленої системи в мережу ($P_{gs} = 50\%$);

C5: важливий перехід з розподіленої системи в grid ($P_{gs} = 100\%$).

У наведеному вище, $P_{gs(t)}$ і $P_{sg(t)}$ – потужності, передані від мережі до розподіленої системи та від розподіленої системи до мережі відповідно.

Ці дискретні команди вводяться у відповідність і приймаються як «стани прототипу», встановлені конструктором. Вони чисельно визначаються відповідно до рівняння шляхом накладання значень для змінних V_b , ΔV та dep .

Очевидно, складові векторів стану необхідно нормалізувати перед оцінкою цієї відстані. Правило прийняття рішення, дуже просте, визначте який «стан прототипу» найближче до поточного вектора стану, і прийміть команду, що відповідає цьому «стану прототипу»..

Другий підхід нечіткого типу, в якому енергетичний стан системи оцінюється в лінгвістичних термінах. У цьому випадку принцип керування, показаний вище, зберігається, але всі змінні, задіяні в системі, включаючи команду, що задає напрямок і величину передачі енергії, отримуються шляхом нечіткої оцінки, а закон керування — за допомогою нечіткий висновок.

Оцінка двох підходів показує, що нечіткий підхід дозволяє більш тонко контролювати передачу енергії. Метод, заснований на чітких змінних, може бути представлений як окремий випадок нечітких методик, коли в реалізації використовуються спеціальні функції належності, що дозволяє уникнути обчислення відстані між векторами [7]

Проектування та випробування системи управління вищого рівня здійснюється з урахуванням кількох сценаріїв режиму роботи. Створення цих сценаріїв пов'язане з наступними вимогами:

- тестування роботи системи в різних ситуаціях щодо відновлюваних джерел енергії. Для проектування розподіленої системи необхідно враховувати щонайменше два режими: літній і зимовий;

- перевірка роботи системи в двох режимах роботи батареї: буферному, що вважається стандартним, і періодичному режимі, в якому цикли зарядки та розрядки відбуваються під час нормальної роботи розподіленої системи. Ці цикли рекомендуються для збільшення терміну служби акумулятора.

2.2. Прогнозування випадкових величин із розподіленої енергетичної системи

Прогнозування електроенергії з відновлюваних джерел енергії є важливою проблемою. Алгоритми прогнозування реалізовані на основі лінійних моделей часових рядів AR та ARMA. Результати, отримані за допомогою цих класичних алгоритмів, були дуже різними, залежно від фізичної природи передбачуваного часового ряду. Таким чином, середньо- та довгострокові компоненти швидкості вітру мають автокореляційну функцію з дуже повільним зменшенням варіації, що дає хорошу можливість для прогнозування.

Хороші результати, отримані в цьому випадку, ілюструються зразком, показаним на рисунку 2.1, де враховуються різні значення горизонту прогнозування при використанні моделі типу ARMA. Прогноз компонента турбулентності має більш скромні результати, прогноз може бути

прийнятним лише для кількох кроків вибірки. Пояснення дуже просте, властивості турбулентності дуже близькі до властивостей білого шуму, оскільки формуючий фільтр для компонента турбулентності є другого порядку з унітарним надлишком полюса [8]

У цих умовах автокореляційна функція має швидке зменшення варіації, і, отже, передбачення є дуже важким. Однак для вітрових систем малої потужності, як розглядається в цій роботі, навіть прогнозування на дуже короткий час горизонту (кілька секунд) може уникнути деякого перемикання типу розрядка-зарядка-розрядка з режиму роботи батареї. Як зазначалося, прогнозована змінна в системі – це різниця між сумою потужностей відновлюваних джерел енергії та спожитою потужністю за навантаженням.

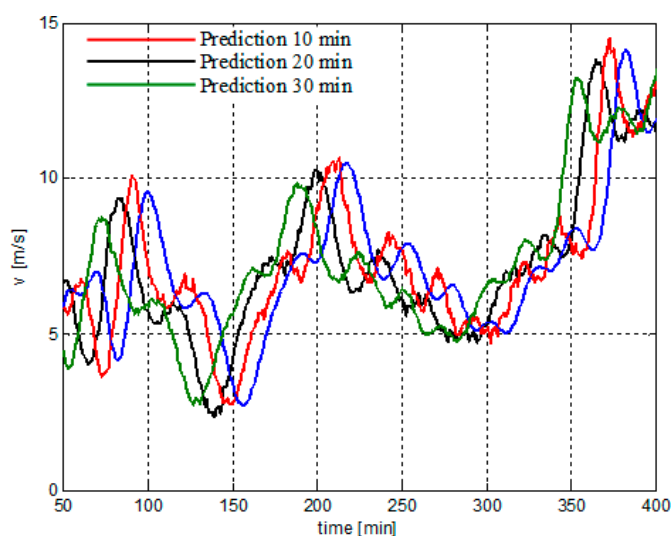


Рис.2.1 Прогноз сезонної складової швидкості вітру, $v(t)$ (синя лінія), за 10, 20, і 30 хв (червоний, чорний і зелений відповідно). [9]

У випадку цієї змінної є два компоненти, які суттєво обмежують ефективність прогнозування. Одним з них є турбулентна складова швидкості вітру. Інша – випадкова зміна потужності навантаження (локальна мережа). Оскільки середнє значення цього навантаження є нижчим, більш важливими є відсоткові випадкові зміни потужності, а прогноз надлишку/дефіциту потужності є складнішим. Дві версії алгоритму

нечіткого керування розподіленою системою, використовують інформацію, надану предиктором з коротким часовим горизонтом.

2.3 Схеми управління для розподіленої енергетичної системи

Алгоритм керування перенесенням електричної енергії між компонентами системи реалізований у вигляді системи керування напругою акумулятора з використанням нечітких методів. Контролер цього шлейфа був розроблений у двох варіантах, наступним чином.

Перший варіант алгоритмів керування проілюстрований на схемі, наведеній на рисунку 2.2. Входами контролера є компоненти вектора x_s . У програмі моделювання розглядалася батарея з номінальною напругою 48 В.

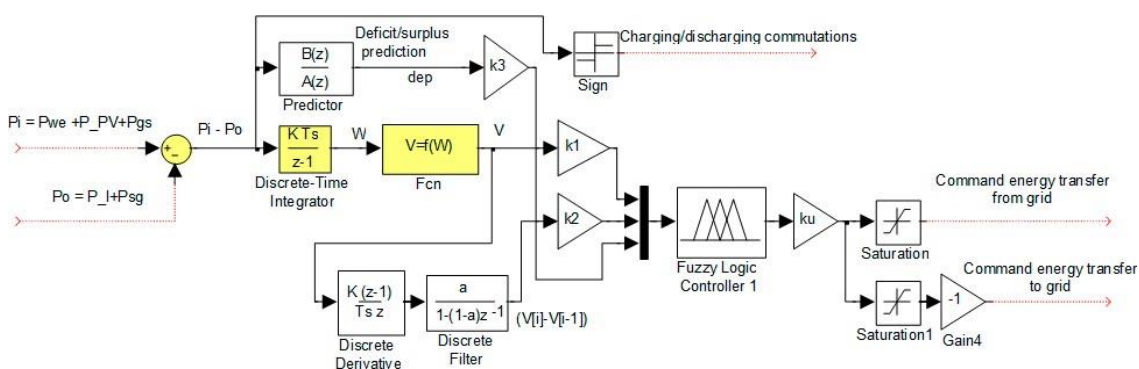


Рис. 2.2 Схема контролера у Варіанті 1 алгоритму керування [10]

Враховуючи ефект посилення шуму при виконанні числового виведення, на вхід ΔV після похідного елемента вставляли фільтр зі статичним посиленням. Після масштабування з коефіцієнтом $k_u = 1$, використовується для керування потоком енергії від мережі до розподіленої системи, а негативна складова використовується для управління потоком енергії від розподіленої системи до мережі.

Фазифікацію вхідної напруги проводили з урахуванням трьох лінгвістичних термінів з трикутними функціями належності. Величина 48,5В розглядалася як центр мовного значення «М» = середнє. Відносно цього значення були враховані мовні значення: «S»= small і «B»= Big. Для фазифікації вхідних даних ΔV і dep були використані два лінгвістичні значення («N» = негативне та «P» = позитивне) з функціями належності Гаусса.

Що стосується виходу контролера, було прийнято u , п'ять лінгвістичних значень з функціями належності однотонного типу: позитивне велике (PB), позитивне середовище (PM), нуль (Z), негативне середовище (NM) і негативне велике (NB). Правила нечіткого контролера наведено в таблиці 2.1. Таблиця 2.1 також показує відповідність між нечіткими командами та командами чіткої стратегії.

Таблиця 2.1 Правила нечітких контролерів.

V_b	ΔV	dep	u	<i>Corresponding Crisp Strategy</i>
S	N	N	PB	C1
S	N	P	PM	C2
S	P	N	PM	C2
S	P	P	Z	C3
M	N	N	PM	C2
M	N	P	Z	C3
M	P	N	Z	C3
M	P	P	NM	C4
B	N	N	Z	C3
B	N	P	NM	C4
B	P	N	NM	C4
B	P	P	NB	C5

Другий варіант алгоритмів керування реалізується за допомогою регулятора напруги, схема якого наведена на рисунку 2.3. Уставка напруги, яка явно вказана, може бути встановлена або зафіксованим значенням, наприклад 48,5 В, або з сигналу, генератор який забезпечує періодично змінюваний темп із середнім значенням 48,5 В. Обидва контролери двох варіантів еквівалентні закону керування псевдопропорційно-похідного типу з випередженням щодо порушення дефіциту та надлишку енергії.

Відсутня інтегративна складова не є важливою перешкодою, оскільки на практиці система завжди працює в динамічному режимі, а напруга батареї має бути в районі значення, що відповідає «зарядженому» режиму батареї. Фазифікацію контрольної помилки проводили з урахуванням трьох лінгвістичних термінів з трикутними функціями належності. Два інших входи та команда контролера підтримують ту ж фазифікацію, що й у першому варіанті. Крім того, таблиця правил подібна до попереднього контролера.

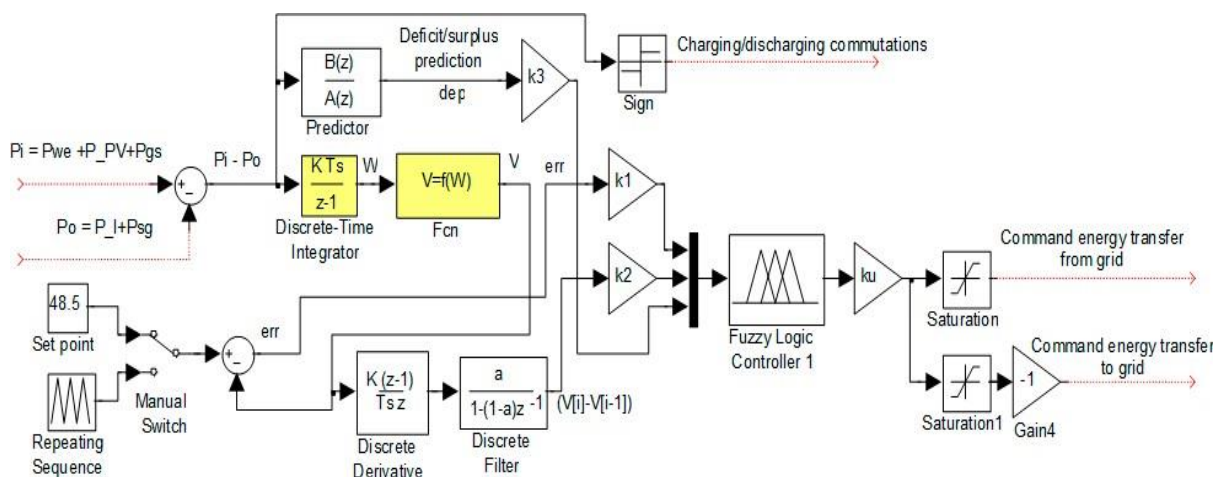


Рис. 2.3 Схема контролера у Варіанті 2 алгоритму керування[11]

2.4 Критерій ефективності розподіленої енергетичної системи

З описаного вище сценарію стає зрозумілим, що в розподіленій системі споживання електроенергії з навантаженням (локальна мережа) є

випадковою величиною, а два джерела електроенергії (вітер і сонячна) також є випадковими величинами. Третє джерело енергії — мережа, яка є резервним джерелом. Для регулювання передачі енергії між джерелами і навантаженням використовується акумулятор. Його роль полягає у використанні накопиченої енергії таким чином, щоб передача енергії від мережі до навантаження була якомога меншою. Отже, першим обмеженням, яке необхідно накласти, є зниження вартості електроенергії, що споживається з мережі.

По суті, на змінну E впливають три фактори: потужність, вироблена відновлюваними джерелами енергії навантаження і команду, яку дає система управління, яка визначає зміну енергії, що зберігається в батареї. Для ілюстрації процесу було розглянуто розподілену систему з добовою зміною, що визначається споживанням електроенергії в локальній мережі. Батарея розподіленої системи має 800 Ач, а сонячні та вітряні джерела мають номінальну потужність 1,5 кВт [12]

Передбачалося, що джерело вітру працює з огляду на профіль швидкості вітру та для джерела сонячної енергії розглянуто зміну сонячної опромінення, характерне для літнього дня. У цих умовах результати, показані на рисунку 2.4, були отримані шляхом чисельного моделювання розподіленої системи, енергія передана від мережі до розподіленої системи енергія, передана від розподіленої системи до мережі, та рахунки за електроенергію.

Інший важливий критерій, який розглядається для управління розподіленою системою, - це збільшення терміну служби батареї і, таким чином, підвищення стійкості системи. Висока вартість батареї та той факт, що термін її служби залежить від умов експлуатації, виправдовують вимогу, що висувається до системи управління, щоб забезпечити якомога більший термін служби батареї.

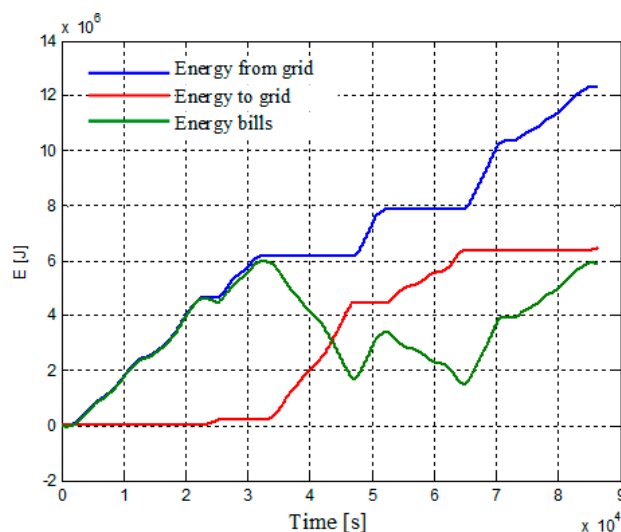


Рис. 2.4 Еволюція енергії, що передається від мережі до розподіленої системи (синя лінія), енергії, що передається від розподіленої системи до мережі (червона лінія), та рахунків за енергію за 24 години (зелена лінія) [13]

Першим варіантом може бути забезпечення циклу зарядки та розрядки з номінальною швидкістю. Оскільки електроенергія, вироблена відновлюваними джерелами енергії, і споживання в локальній мережі є випадковими величинами, такий підхід може призвести до високих рахунків за електроенергію.

Другим варіантом може бути встановлення режиму, який зменшує вартість рахунків за електроенергію. Однак такий підхід може призвести до високої частоти в перемикачах для зарядки-розрядки акумулятора, що негативно вплине на термін служби батареї. Щоб продовжити термін служби акумулятора, швидкість заряджання та розрядження повинна бути на низькому рівні [14]

Крім того, щоб захистити батарею, важливо уникати глибоких розрядів, батарея повинна бути близько номінального навантаження. Нехай N_{ϵ} — кількість перемикачів заряду та розрядки, які відбуваються в інтервалі $[0, T]$, в той час як акумулятор утримується зарядженим на номінальному значенні з допуском, заданим ϵ . Підтримання напруги батареї в області номінального навантаження може здійснюватися за

допомогою системи управління, яка забезпечує надходження енергії в розподілену систему адекватним чином (з огляду на випадковість навантаження та відновлюваної енергії), відповідно до вимоги, що пред'являються критерієм ефективності. Цей критерій, який враховує дві суперечливі вимоги, зменшення рахунків за енергію, E , і кількість перемикачів заряду/розрядки, $N\varepsilon$, набуває вигляду:

$$I = \int_0^T (\alpha_{gs}P_{gs}(t) - \alpha_{sg}P_{sg}(t)) dt + \gamma^* N \varepsilon \quad (2.1)$$

де γ — коефіцієнт, який зважує два члени критерію продуктивності.

Цей фактор залежить від ціни надходження електроенергії в мережу та з неї, ефективності передачі між джерелами та мережею, а також від властивостей накопичувача. Важливу особливість енергетично розподілених систем надають високочастотні коливання потужності, що постачається джерело вітру (через турбулентну складову швидкості вітру), а іноді і в споживаній потужності навантаження.

Ці коливання можуть викликати часті перемикання між режимами зарядки та розрядки в контурі керування напругою акумулятора, що негативно позначається на терміні служби акумулятора. Рисунок 2.5а ілюструє комутації заряду та розряду протягом 24 год для роботи розподіленої системи за умов, згаданих вище. Імітаційна модель системи забезпечена блоками обробки стрибків типу, показаного на рисунку 2.5а. Це було зроблено для того, щоб при кожній комутації зарядка–розрядка–зарядка змінна $N\varepsilon$ збільшується з постійним значенням. У цих умовах еволюція другого члена критерію, заданого рівнянням (2.1), яке оцінює кількість перемикачів заряду та розряду, показано на рисунку 2.5б.

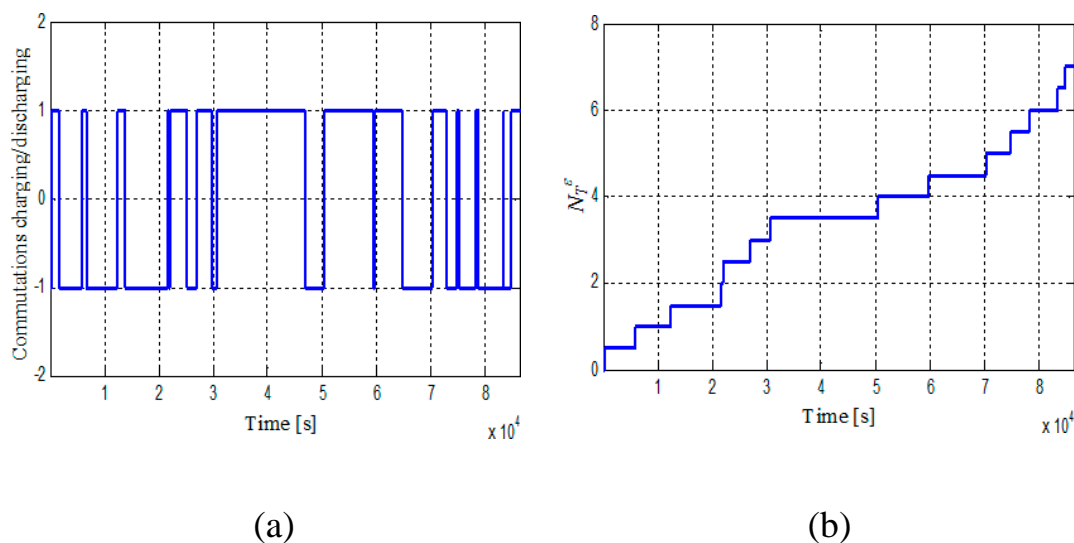


Рис.2.5 Еволюція компонента, що відповідає комутації режимів функціонування: комутація зарядка/розрядка (а); і відповідний компонент з рівняння (12) (b) [15]

На відміну від критеріїв ефективності нижнього рівня ієрархічної структури управління, яка оптимізується в режимі реального часу за допомогою систем автоматичного керування, рівняння (2.1) використовується в автономному режимі на етапі проектування для встановлення параметрів системи керування на вищому рівні. Це рішення визначається тим, що мінімізація рівняння (2.1) справедлива лише для даного профілю (розглянутого в конкретному випадку) кривих еволюції потужності для відновлюваних джерел енергії та навантаження, причому обидві змінні мають випадкові зміни. В іншому випадку, коли ці змінні мають різну еволюцію, параметри системи керування, які мінімізують рівняння (2.1), будуть іншими.

У цих умовах встановлення параметрів, задіяних в алгоритмі керування на вищому рівні розподіленої системи, можна виконати за допомогою чисельного моделювання, тобто аналізу продуктивності системи в різних ситуаціях, пов'язаних з екзогенними випадковими величинами. [16]

РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Оцінка багатокритеріальних показників ефективності

Метою цього розділу є проілюструвати потоки енергії від розглянутої розподіленої системи і особливо, зробити порівняльний аналіз продуктивності двох реалізованих варіанти алгоритму управління на вищому рівні. Для порівняльного аналізу двох варіантів були використані однакові потужності, що виробляються сонячними та вітровими джерелами, а також споживана в локальній мережі. З безлічі можливих ситуацій, що стосуються відновлюваних джерел енергії та споживання електроенергії в локальній мережі, розглянуто випадок, що загальна енергія, вироблена відновлюваними джерелами, перевищує енергію, спожиту навантаженням протягом прийнятого інтервалу часу в день. (тобто $T = 86\,400$ с).

Попереднє тестування нечіткого контролера, що реалізує цей варіант алгоритму керування було виконано з урахуванням відновлюваних джерел енергії та навантаження. На рисунку 3.1 показано напруга батареї, яка змінюється в районі 48,5 В, значення, накладене фазифікацією входу V . Командна змінна, генерована нечітким контролером, є наведено на рисунку 3.2, де синій колір представляє потужність, передану від розподіленої системи до мережі, а червоний колір показує потужність, передану від мережі до розподіленої системи. Можна помітити, що між мережею та розподіленою системою завжди відбувається передача енергії в тій чи іншій мірі.

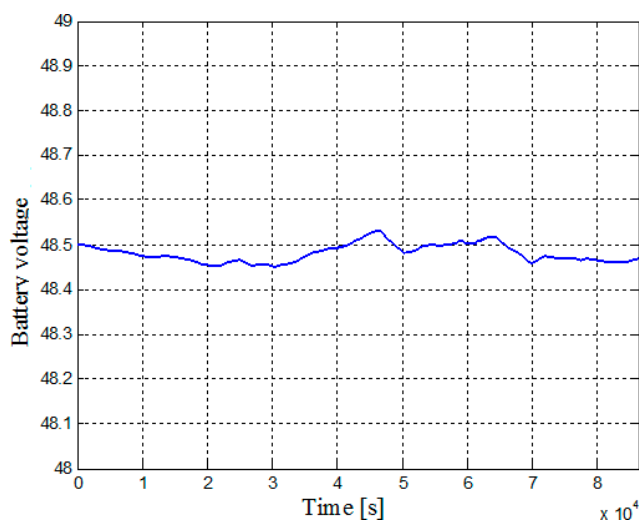


Рис. 3.1 Напруга акумулятора. [17]

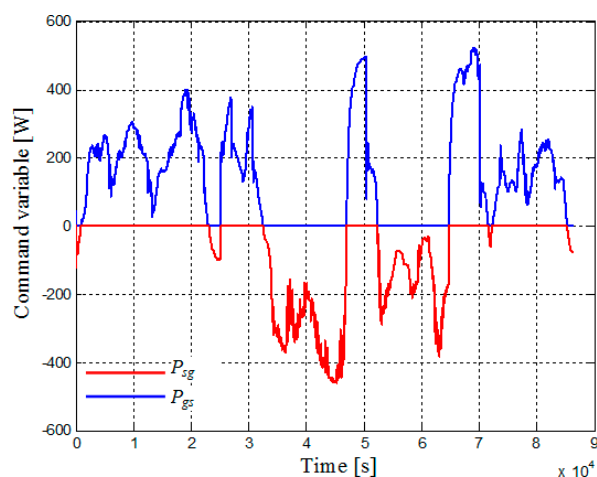


Рис. 3.2 Командна змінна: потужність передається від мережі (синій) і до мережі (червоний) [17]

У першому випадку (варіант 1) алгоритму керування, еволюція потужності, отриманої системою, P_{we} , P_{gs} , потужності, переданої в навантаження і в мережу, P_l , P_{sg} , і дефіцит та надлишок потужності представлені на рисунку 3.3. На рисунку 3.4, у співвідношенні з рисунком 3.3, можна помітити, що для акумулятора відбувається велика кількість перемикачів заряду/розрядки. Це викликано головним чином турбулентними коливаннями швидкості вітру. Еволюція енергії, спожитої з мережі, переданої в мережу, та рахунки за електроенергію наведені на рисунку 3.5.

Для оцінки багатокритеріального показника ефективності, необхідно було використовувати γ коефіцієнт, який зважує два терміни критеріїв продуктивності, щоб мати однакову шкалу для двох факторів. Від'ємне значення енергії підкритерію показує, що енергія, передана в мережу, більша, ніж споживана з мережі. Для аналізу продуктивності розподіленої системи на рисунку 3.6 показано два підкритерії замість суми двох доданків (яка має бути якомога нижчою).

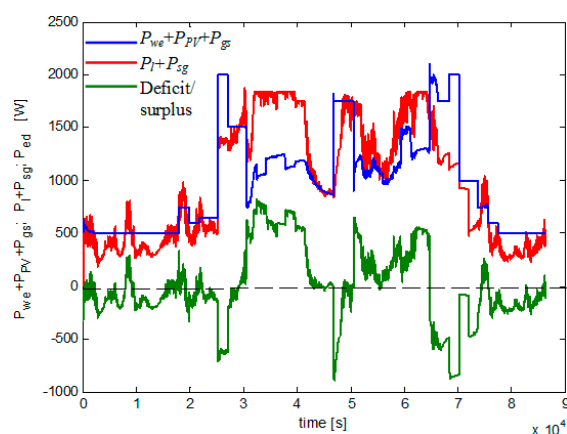


Рис. 3.3 Еволюція електроенергії, виробленої відновлюваними жерелами + електроенергія з мережі (синій); потужність, споживана навантаженням + потужність, передана в мережу (червоний); дефіцит pf надлишок потужності (зелений) [18]

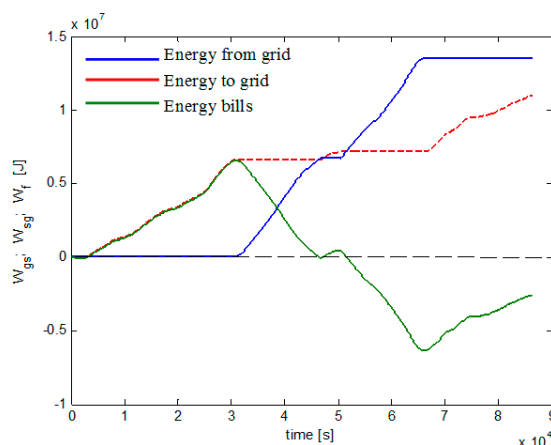


Рис. 3.4 Еволюція спожитої енергії з мережі (синій), переданої в мережу (червоний) і рахунків за електроенергію (зелений). [18]

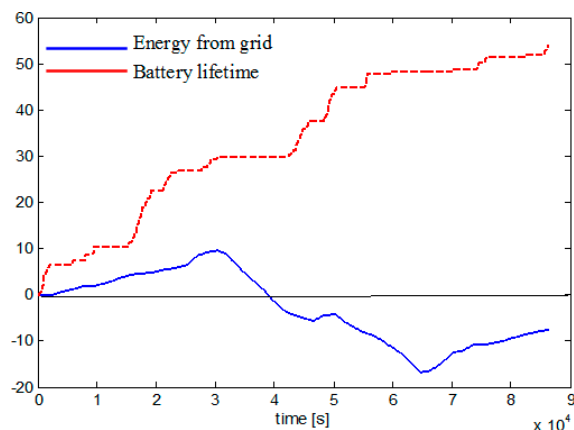


Рис. 3.5 Еволюція підкритеріїв: енергія (синій) і термін служби батареї (червоний) [19]

Отримані результати показали, що прийнята структура нечіткого регулятора має один недолік, а саме не дозволяє отримати режим, в якому відбуваються цикли заряду та розряду, під час нормальної роботи розподіленої системи. Для забезпечення роботи розподіленої системи з нечітким контролером як в буферному режимі, так і в циклах заряд-розряд використовувався контролер у варіанті 2.

Ефективність алгоритму керування, коли задане значення встановлено на 48,5 В, подібні до показаних на рисунках 3.1 і 3.2. Хоча батарея більшу частину часу працює в «буферному» режимі, часто рекомендується, щоб система працювала, навіть на короткий проміжок часу в режимі заряд-розряд. Коли задане значення регулятора напруги акумулятора є постійним, ефективність алгоритму керування варіантом два подібна до показників попереднього випадку.

Для режиму, який забезпечує періодичну зарядку та розрядку батареї при нормальному живленні локальної мережі, показники продуктивності тепер наведені на рисунках 3.6 і 3.7.

Очевидно, враховуючи ефективність схем передачі, інтенсивна передача енергії супроводжується значними втратами в системі. Натомість на перемикачі заряду-розряду рідко впливає еволюція потужності відновлюваних джерел або навантаження.

Найчастіше ці перемикачі практично рівні тим, що накладаються через уставку контуру напруги. Отже, еволюція двох підкритеріїв, показана на рисунку 3.7, вказує на дуже низьку енергетичну продуктивність і хорошу продуктивність з точки зору режиму роботи акумулятора. Слід зазначити, що цей режим короткочасний і є частиною програми обслуговування батареї.

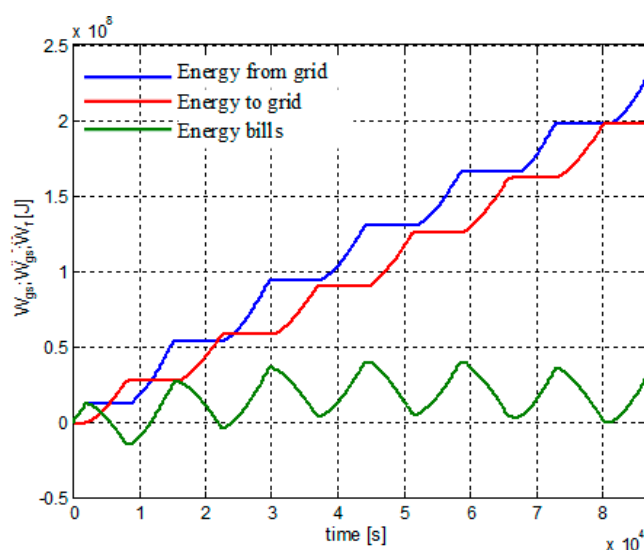


Рис. 3.6. Еволюція спожитої енергії з мережі (синій), переданої в мережу (червоний) і рахунків за електроенергію (зелений) [19]

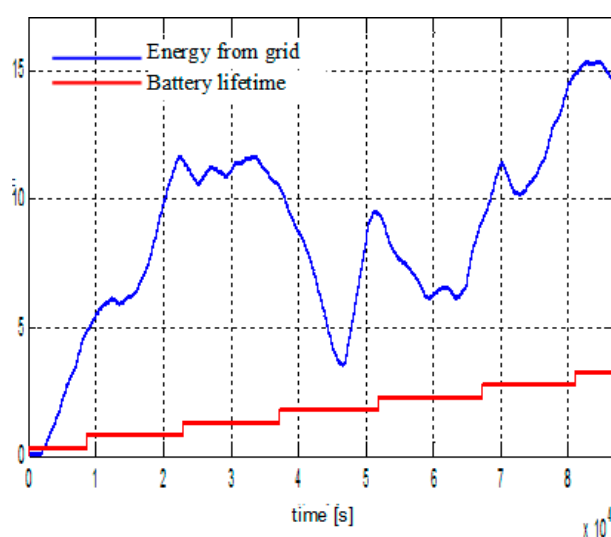


Рис.3.7 Еволюція підкритеріїв: енергія (синій) і термін служби батареї (червоний) [19]

3.2 Покращений інтелектуальний алгоритм керування розподіленою енергетичною системою

Контролери з варіантів 1 і варіантів 2 постійно генерують ненульові команди для передачі енергії в будь-якому напрямку між мережею і розподіленою системою. Постійні зміни команди контролера мають ефект підтримки з достатньою точністю напруги батареї навколо заданого значення. Однак насправді це виконання необов'язково. Напруга акумулятора може коливатися в діапазоні ширини ϵ , що може відповідати мовному значенню для «зарядженої батареї», як це зазначено в рекомендаціях щодо забезпечення тривалого терміну служби батареї.

Натомість параметр ϵ значною мірою впливає на кількість перемикачів заряду та розряду, N_ϵ , яка входить у критерій продуктивності. У цих умовах корисно мати мертву зону в статичній характеристиці контролера, яка забезпечує коливання напруги батареї в заданій області.

На цій основі створено вдосконалений варіант контролера. У варіанті 3 алгоритмів керування використовується спеціальний контролер із мертвою зоною, блок трипозиційного типу, реалізований нечіткими методиками. На відміну від трипозиційного контролера команда ззовні мертва зона, позитивна або негативна, пропорційна похибці керування. Нехай D - мертва зона, накладена на область варіації похибки керування ϵ .

Схема регулятора в цьому варіанті наведена на рисунку 3.9. Робота системи з параметрами $k_1 = 2$, $K = 1000$ і $p = 0,2$, коли задане значення ϵ постійним, проілюстровано на рисунках 3.10 і 3.11. Примітно, що передача енергії, яку командує контролер, набагато нижча, ніж у випадку варіант 1 або варіант 2.

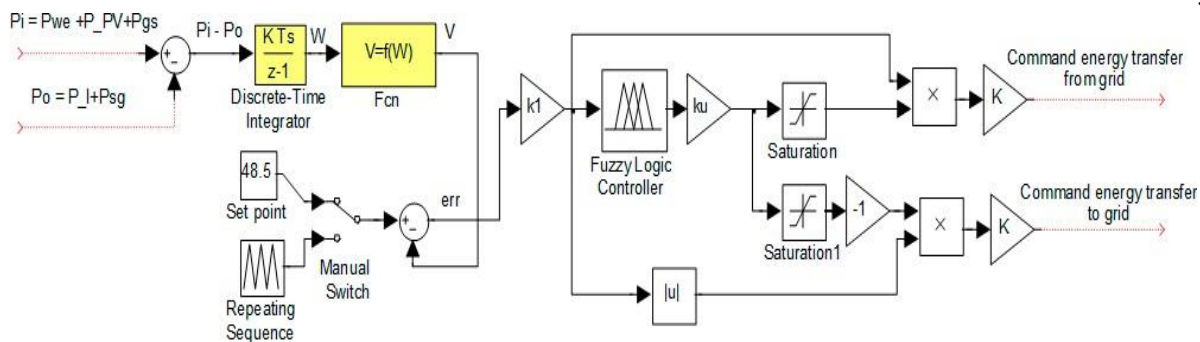


Рис.3.8 Схема контролера у варіанті 3 алгоритму керування. [20]

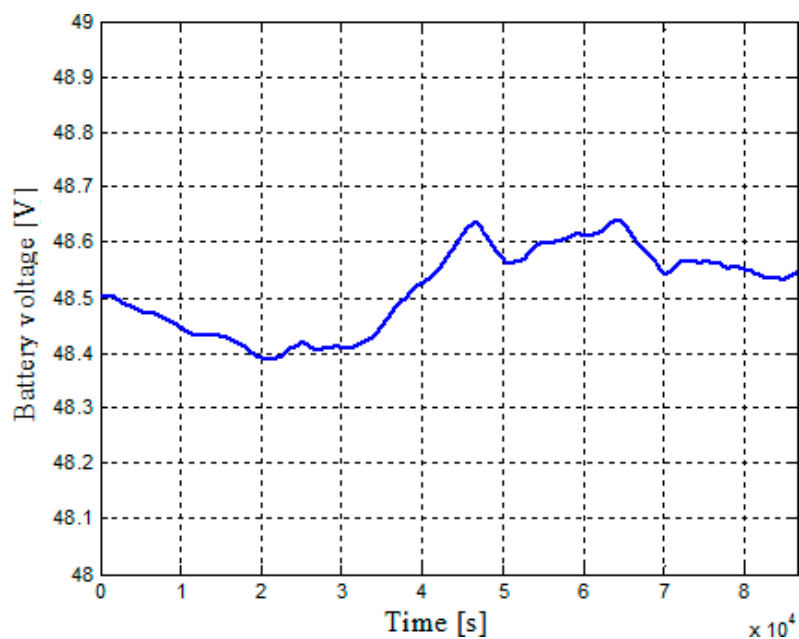


Рис.3.9 Напруга акумулятора. [20]

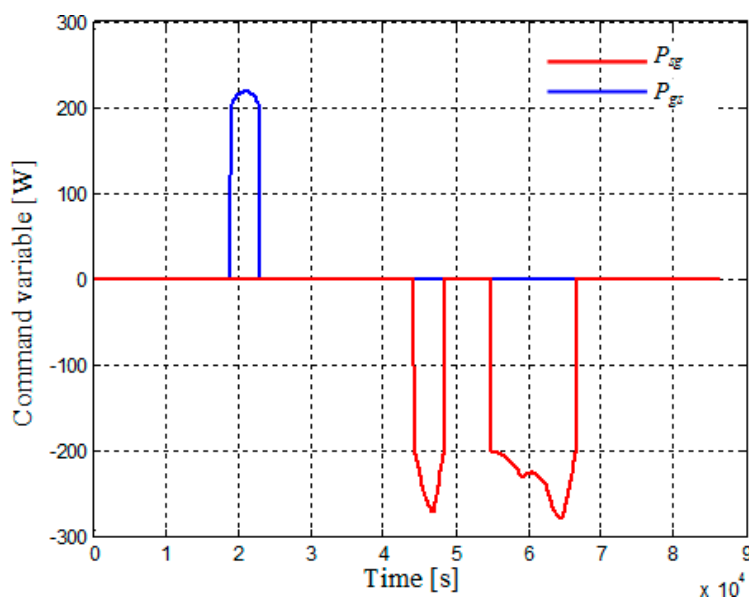


Рис.3.10 Командна змінна: потужність передається від мережі (синій) і до мережі (червоний) [20]

Варіант 3 алгоритму керування призводить до помітно інших результатів у порівнянні з попередніми випадками. Змінні, представлені на малюнках 3.11–3.13.

Можна помітити дуже важливе зменшення кількості перемикачів заряду/розрядки акумулятора. При використанні алгоритму, підкритерій енергії має еволюцію, близьку до варіанту 1, але підкритерій щодо режиму батареї показує значне покращення.

Однією з цілей аналізу продуктивності на основі моделювання є вибір параметра регулятора p . Це вибирається в заданому домені $[0 \text{ } p_{\max}]$, де p_{\max} — допуск номінальної напруги, для якого акумулятор можна розглядати в режимі «заряджена батарея».

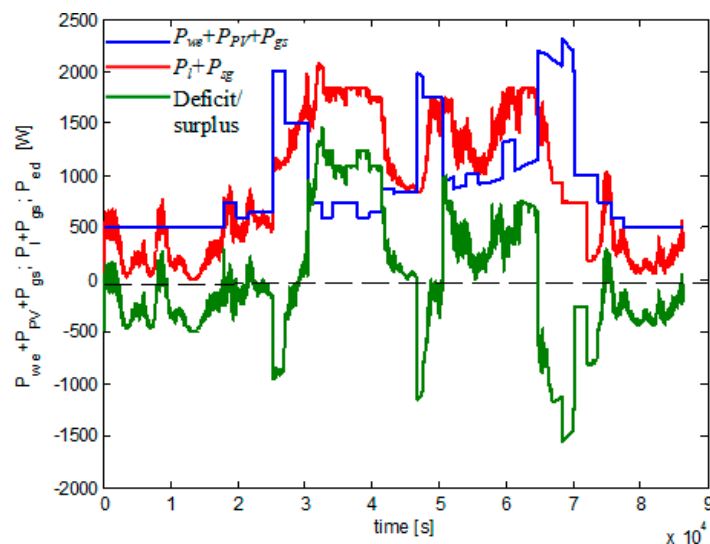


Рис.3.11. Еволюція електроенергії, виробленої відновлюваними джерелами + електроенергія з мережі (синій); потужність, споживана навантаженням + потужність, передана в мережу (червоний); та дефіцит/надлишок потужності (зелений) [21]

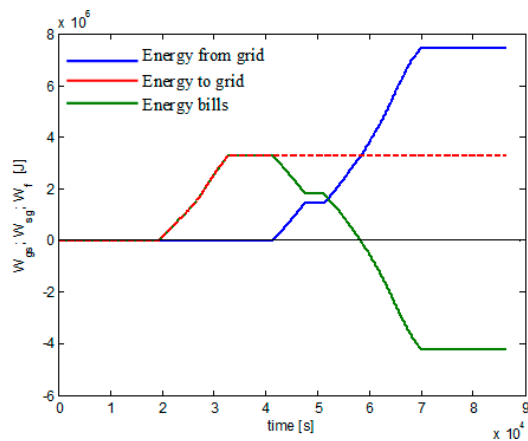


Рис.3.12. Еволюція спожитої енергії з мережі (синій), переданої в мережу (червоний) і рахунків за електроенергією (зелений) [22]

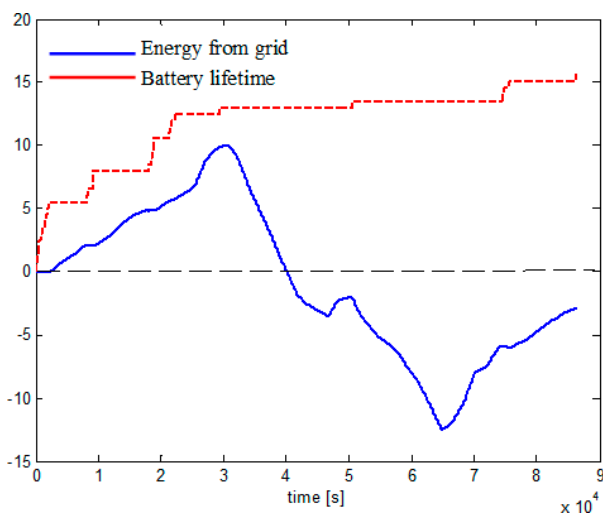


Рис.3.13. Еволюція підкритеріїв: енергія (синій) і термін служби батареї (червоний) [22]

ВИСНОВКИ

В першому розділі описуються моделі, які використовуються для моделювання компонентів розподіленої системи, що дозволяє проектувати та оцінювати різні керуючі рішення для розглянутої системи. Усі відновлювані джерела енергії та навантаження були змодельовані, а також критерій продуктивності. Цей критерій враховує два важливих чинника, що забезпечують стійкість системи: вартість електроенергії, що постачається місцевим споживачам, і термін служби батареї.

У цій роботі запропоновано три варіанти алгоритму керування передачею енергії в системі, реалізованих за допомогою нечітких методик. Це робиться для того, щоб оцінити поведінку розподіленої енергетичної системи при виборі різних алгоритмів керування. Перші два варіанти використовують прогноз дефіциту та надлишку енергії в системі, а третій варіант накладає мертву зону при низьких значеннях похибки керування. Показано, що три варіанти дають подібні результати щодо вартості електроенергії, що постачається місцевим споживачам, коли задане значення вибрано незмінним.

Варіант 3 алгоритму керування дає найкращі результати, тим самим підвищуючи стійкість системи. Ця оцінка враховує, що хоча підкритерій енергії має еволюцію, близьку до того, що було з перших двох варіантів, підкритерій щодо режиму батареї має радикальне покращення. Хоча батарея більшу частину часу працює в «буферному» режимі, програма технічного обслуговування батареї часто рекомендує використовувати її протягом короткого періоду в режимі заряджання-розрядження, щоб збільшити термін її служби. Ця опція була реалізована у варіантах 2 та 3 алгоритму керування, і отримані результати показали, що підкритерій енергії не вплинув.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Garcia-Sanz and C.H. Houppis. Wind Energy Systems: Control Engineering Design. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2011.
2. Germanischer Lloyd. Wind turbine standards and certification, 2010.
3. (International Electrotechnical Commission). IEC-61400, Wind turbine standards, 2007.
4. NREL (National Renewable Energy Laboratory). NWTC Design Codes (FAST), An Aeroelastic Design Code for Horizontal Axis Wind Turbines, 2010.
5. AWEA (American Wind Energy Association). Wind Energy Basics [Online], 2007. Available at http://www.awea.org/newsroom/pdf/Wind_Energy_Basics.pdf.
6. T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi. Wind Energy Handbook. London: Wiley, 2021.
7. E. Hau. Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics (2nd ed.). Berlin: Springer, 2006.
8. E.F. Camacho, F. Rubio, M. Berenguel, and L. Valenzuela. "A survey on control schemes for distributed solar collector fields (part 1 and 2)," Solar Energy, vol. 81, pp. 1240-1272, 2007.
9. P. DeLaquil, B. Kelly, and R. Lessley. "Solar One Conversion Project," Solar Energy Materials, vol. 24, no. 1-4, pp. 151-161, December 2, 2021.
10. D. Kearney. "Solar Electric Generating Stations (SEGS)," IEEE Power Engineering Review, vol. 9, no. 8, pp. 4-8, 1989. doi:10.1109/MPER.1989.4310850.
11. E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio, and D. Martinez. Control of Solar Energy Systems. Berlin: Springer Verlag, 2010.
12. M. Berenguel, F.R. Rubio, A. Valverde, M.R. Arahall, E.F. Camacho, and M. López. "An artificial vision-based control system for

automatic heliostat position in offset correction in a central receiver solar power plant,” *Solar Energy*, vol. 76, no. 5, pp. 523-653, June 2014. ISSN 0038-092X.

13. F.J. García-Martín, M. Berenguel, A. Valverde, and E.F. Camacho. “Heuristic knowledge-based heliostat field control for the optimization on the temperature distribution in a volumetric receiver,” *Solar Energy*, vol. 66, no. 5, pp. 355-369, August 2009. ISSN 0038-092X.

14. L. Valenzuela, E. Zarza, M. Berenguel, and E.F. Camacho. “Direct steam generation in solar boilers,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 24, no. 2, pp. 15-29, 2014.

15. J.Y. Cai, Z. Huang, J. Hauer, and K. Martin. “Current status and experience of WAMS implementation in North America,” in *Proc. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, Dalian, China, 2015.

16. U.S. Department of Energy. 20% Wind Energy by 2030. Increasing Wind Energy’s Contribution to U.S. Electricity Supply, DOE/GO-102008-2567, July 2018.

17. European Wind Energy Association. *Wind Energy - The Facts*. Earthscan, 2009.

18. European Wind Energy Association. *Winning with European Wind*, EWEA 2008 Annual Report, June 2009.

19. European Wind Energy Association. *Wind at work: Wind Energy and Job Creation in the EU*, January 2009.

20. SolarPaces. *Concentrating Solar Power Global Outlook 09* [Online], 2009. Available at <http://www.solarpaces.org/Library>.

21. White House. *Weekly address* [Online], July 3, 2010. Available at, <http://www.whitehouse.gov/blog/2010/07/03/weekly-address-a-solar-recovery#>.

22. U.S. Department of Energy. *Solar Energy Technologies Program - 2009 Annual Report*, 2009.